90-06424/

Published in the proceedings of the Colloque "La route et l'informatique", Paris, France, March 13-15, 1990, 646-655.

CRT-701A

AN EXPERT SYSTEM FOR THE ASSESSMENT OF THE STRUCTURAL CAPACITY OF PAVEMENTS

by

Bernard Lefebvre[1,2]
Michalis Pehlivanidis[3]
Gaston Larose[3]
Daniel Ferrero[1,2]
Michel Gendreau[2]

[1] Département d'informatique et recherche opérationnelle, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale A, Montréal, Québec CANADA H3C 3J7.

[2] Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale A, Montréal, Québec CANADA H3C 3J7.

[3] Service des sols et chaussées, Ministère des Transports du Québec, 200 boul. René-Lévesque sud, 3e étage, Québec, Québec CANADA G1K 5Z1.

Centre de recherche sur les transports - Publication #701A

June 1990

Dépôt légal - 2e trimestre 1990

ABSTRACT

This paper presents a methodology which has been used to constitute the knowledge base of an expert system. This system is intended to help in the on the spot interpretation of the results produced by Dynaflect machines which are used for the assessment of the structural capacity of pavements. The paper is largely devoted to the presentation of a number of statistical analyses. The results of these analyses were used to implement a prototype of the proposed system.

Key words: Expert systems; highway maintenance; structural capacity; Dynaflect.

RESUME

Cette communication présente la méthodologie qui a servi à la constitution d'une base de connaissances pour un système expert. Ce système aide à l'interprétation, sur place, des résultats fournis par un appareil Dynaflect dont le rôle est d'évaluer la capacité structurale des chaussées. Une large part de cette communication est consacrée à la présentation d'analyses statistiques dont les résultats ont permis la mise en place d'un prototype du système envisagé.

Mots clés: Systèmes experts; entretien routier; capacité structurale; Dynaflect.

1. Introduction

The Dynaflect is a widely used instrument to measure a road capacity to support traffic load. A sampling with this instrument consists in recording the effect of the impulses generated by the Dynaflect. Usually the distance between two samplings varies from few meters to several hundred meters. The Dynaflect is well suited when dealing with old roads or roads in which structures differ from today's standards. The use of Dynaflect allows one to isolate road portions with homogeneous deflection values (structural adequacy) in a non-destructive way.

When diagnosing the causes of the deficiencies of the pavement, the on the spot interpretation of the results generated by the Dynaflect is particularly interesting because it allows one to get the maximum from visual information such as the condition of the pavement, subsurface drainage, etc. This interpretation could be simplified with the use of an intelligent computer-based system that has some knowledge of the physics of pavement. This interpretation could be done simultaneously with the Dynaflect sampling.

The main goal of our project is to develop such a system. This work has been made easier with the more rational use of the Dynaflect owned by the Ministère des Transports du Québec. In fact, it is now possible to record directly in a digital form the signals generated by the Dynaflect.

Some studies have already been undertaken to predict the structural adequacy of the pavement using data from the Dynaflect [Bon88, Smi85, Wah85]. Those studies were used to produce decision trees based on specific thresholds. Apparently these boundary values have been established in an empirical way; this can be suspected because it was impossible to find in the literature any complete statistical study on which those values are based. Moreover, it seems doubtful that those values could be used for all types of pavements and in all situations. To design the structure of the knowledge base of our system, it was decided to study the discriminating capacity of the Dynaflect as well as the relationships between the structure of the roads and the values generated by the Dynaflect. This way, we would be able to have a better idea of the nature of the structure and the infrastructure of the road. This study is based on the data available in the pavement management system of the Ministère des Transports du Québec.

2. Road database

The database contains information from sixteen roads with a total length of about two hundred kilometers. These roads are located in the most densely populated area of Québec, spanning from

the eastern part to the western part of the province. Since these roads are located in a rural environment, they do not have an important traffic load.

Two thirds of the road considered during the study are built in a flat environment and the remaining in hilly environment. The nature of the soil is very diverse, in some places it is swampy with a rocky base, in other places, one finds clay, sand and gravel.

When considering the soil samples, their stratigraphy was found to be very diverse. The thickness of the pavement is sometimes as small as five centimeters and sometimes as large as forty centimeters, but it is usually between ten and twenty centimeters. The thickness of the foundation is between twenty-five centimeters and about one meter, the mean being seventy-five centimeters.

These different combinations allowed us to get a broad range of results from the Dynaflect. These results were corrected according to the procedures shown in [Arc78] in order to consider the effect of the temperature knowing that those samplings were collected in the summer. The database contains as much as 3120 Dynaflect samplings.

Along with the Dynaflect samplings, we have for the same set of roads soil samplings taken not necessarily at the same position where Dynaflect samplings had been collected. These samplings allow us to have a very good idea of the structure of the pavement as well as the soil beneath the surface up to 3 meters. The database contains 400 of these samplings.

3. Statistical analysis: methodology

Instead of doing classic statistical analyses with conventional tests, leading to partial and non precise results due to the diversity and the scarcity of the data, it was decided to use a qualitative methodology.

The analysis is based on compressed data to obtain a more synthetic view of the behaviour of the results from the Dynaflect versus the soil samplings.

3.1. Compression of the sensors (Dynaflect) data

The values collected from the 5 sensors have been grouped into 4 classes where each class boundary corresponds to the quartiles (q1 and q3) and the median (q2).

- gi1: represents the values from the sensor i, less than the first quartile q1,

- gi2: the values greater than or equal to q1 and less than the median q2,
- gi3: the values greater than or equal to q2 and less than q3,
- gi4: the values greater than or equal to q3.

3.2. Compression of the soil sampling data

These very complex and diverse data have been interpreted in such a way that only certain elements have been retained. This way of synthetizing implies that we lose a certain amount of the overall information, but it allows for the formation of clusters of samplings.

Two techniques have been used:

- the first one considers the presence of certain materials at given depths,
- the second one considers only certain materials and takes into account the thickness of these materials.

3.2.1. Depth compression

The different materials considered in our study that could be part of the foundation of the road have been grouped in the following categories:

- asphalt concrete labelled: "b",
- gravels (gw, gp, gm, gc or some combinations) labelled: "A",
- sands (sw, sp, sm, sc or some combinations) labelled: "B",
- clays (ml, cl, mh, ch) labelled: "C",
- organic soils labelled: "D",
- organic products labelled: "E",
- rock labelled: "F",
- other materials labelled: "G".

Since the Dynaflect is very sensitive to the asphalt concrete, it was decided to consider the thickness of this layer. We have considered 3 boundary values (8cm, 11cm and 14cm) that correspond to the quartiles and to the median. These 4 groups of thickness have been labelled from "b1" to "b4". As for the other materials we have considered only the presence of the given material at the following depths: 0.3m, 0.5m, 0.75m, 1m and 1.5m. For example, the symbol "10B" represents the presence of sand at a depth of 1 meter. This way of coding does not allow one to consider the structural condition as a whole. It could be acceptable if the sensitivity of the Dynaflect was limited to certain depths: sensor 1 for the asphalt concrete layer, sensor 2 to the

first layer of the structure, etc. Even though the boundaries have been chosen considering this hypothesis, it was noted that certain factors like the presence of rock at certain depths had a serious impact on the results from the 5 sensors. In order to take into account this type of interaction, another type of coding was implemented.

3.2.2. Thickness compression

The data collected from the soil samplings have been grouped into three categories: the asphalt concrete, the gravels and the sands. For each of these layers, three types of thickness have been considered: small, medium and important. The boundary values used to delimit these classes are: 10cm and 15 cm for the asphalt concrete, 30cm and 60cm for the gravels and the sands.

The symbol "." indicates a weak or null thickness, the symbol "o" indicates a medium thickness and finally "O" indicates an important thickness.

The nature of the infrastructure has been taken into account using a fourth symbol which is "C" if some clay has been encountered or "F" if the presence of rock has been detected.

3.3. Correspondence arrays

Correspondence arrays have been generated using the data collected from the 5 sensors and those generated by the soil samplings. These arrays allow one to highlight the relationships between the entities under study. The first array uses the sensor variables (gij) and the depth compression data, the second one uses the same sensor variables and the different categories of materials and thickness.

The correspondence between a sensor variable (say, g13) and a soil sampling variable like ".oO" or "10A" is measured by the number of associations found in the available data for the whole set of roads. Sometimes it was impossible to obtain for a given Dynaflect sampling the corresponding soil sampling. But, since the distance is relatively small (10 meters or so), this approximation is considered fair. In a previous study, it was shown that only in certain cases the nature of the soil could change significantly and therefore implies certain differences between the Dynaflect samplings.

4. Statistical analysis: results

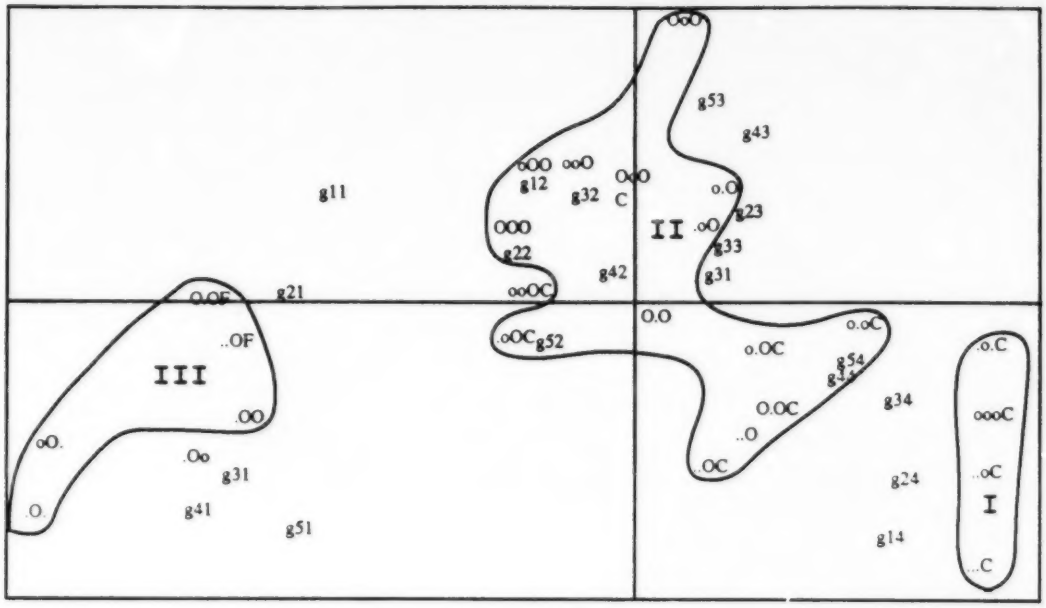
The previously defined arrays have been processed using the following methods:

- first, factorial analysis of correspondence;
- second, hierarchical clustering.

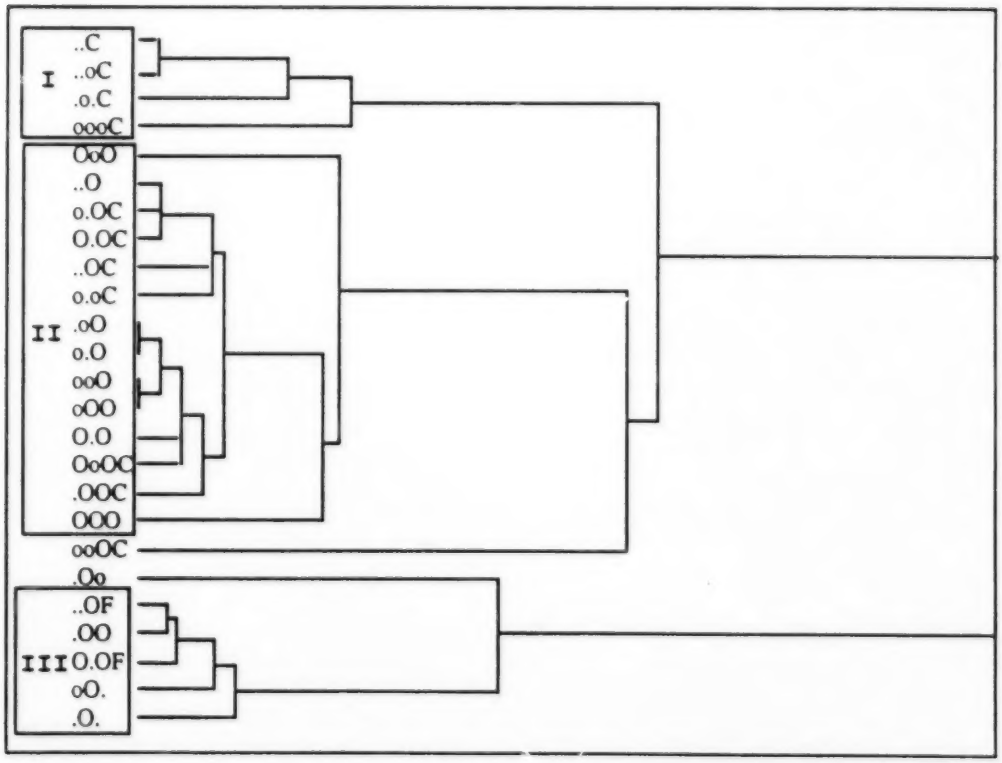
These two methods have been combined to highlight the influence of the structure of the road on the values collected from the Dynaflect. The factorial analysis of correspondence allows one, using a graphical representation, to see the proximity between the variables used in the array: the sensor variables on one side and the soil sampling on the other. Finally, this method allows one to combine these two sets using a simultaneous representation which highlights the reciprocal influences of the two groups. The hierarchical clustering allows one to group variables of the same type. These groups can be projected on the same representation generated by the factorial analysis. This way one can achieve a better summary and the analysis is therefore simplified.

A certain number of studies were done by combining the various codings and by taking into account certain aspects of the structure. Unfortunately, it is not possible to list all the results, but for the sake of clarity, we now present a few examples.

The planes of axes 1 and 2 presented in the following figure make it possible to capture 70% of the total inertia. Thus, it is a quite fair summary of the relative proximities as well as of the respective influences between sensors and soil samplings. The combinations of structures with a too small number of occurrences have been eliminated. Axis 1 (horizontal) shows the large values for the sensors as opposed to the smaller ones. It also shows road structures with clay as opposed to the same structures with rocky base. Axis 2 (vertical) is influenced by the behaviour of sensor 1 and it opposes pavements with a thin layer of asphalt concrete to the ones with a thicker one.



Factorial analysis of correspondence of the array containing sensor variables and thickness compressed structural condition: axes 1 and 2



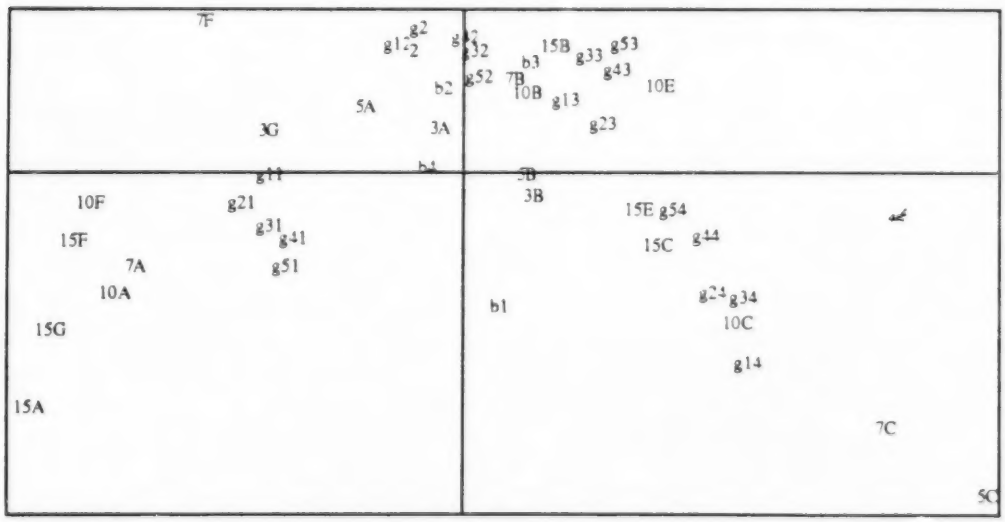
Hierarchical clustering of the thickness compressed structural condition

It can be noted that except for the class with small values, there exists only minor differences between the 5 sensors.

A hierarchical clustering using the Chi2 for the distances and the barycentric criterion allows us to distinguish 4 main classes which have been projected on the factorial representation.

- a class (I) containing weak pavements on a clay base,
- a class (II) containing good pavements or with minor structure deficiencies,
- a last class (III) containing pavements similar to the ones belonging to class II but with a rocky (or very strong) base which is probably formed by gravels.

The noteworthy element of the representation is the influence of the base soil on the values collected from the Dynaflect. This is one of the factors that should be taken into account by the expert system when analyzing the results. This influence was also noted in the results obtained from a study where the structural conditions were represented by a coding in which only the presence of certain materials at certain depths appears.



Factorial analysis of correspondence of the array containing sensor variables and depth compressed structural condition: axis 1 and 2

Rocky and gravel soils give small values for the entire set of sensors. In that sense, they are opposed to clay-based soils that lead to big values. Another remark concerns the fact that the closer the clay is to the surface, the bigger the value for sensor 1. As we said before, this

representation does not consider the structural condition as a whole. Therefore the indications we are getting should take this fact into account.

These studies show the discriminating power and the sensitivity of the Dynaflect at the structure level and at the infrastructure level. The amount of data available is too small to allow us to take into account, in the coding, all the aspects relative to the structure and the infrastructure of the road. These partial studies have given us a methodology to analyze and generate rules. A raw set of results is available and could be completed and updated when new data become available in the pavement management system. In the short term, when a set of correspondence arrays will be available, each one corresponding to a particular situation of the infrastructure of the road: clay-based soil, organic soil, rocky soil, etc. As soon as the context relative to a Dynaflect sampling has been defined and the adequate array chosen, then a simple and fast distance computation will allow one to extract the nearest road structures of a given type (say ".oO") and to give the best associations between the Dynaflect sampling and the soil sampling.

5. The knowledge base

This knowledge base is a prototype and it has two complementary sets of rules:

- rules that allow one to perform analyses based on the results of the statistical studies,
- rules permiting the analysis of similar situations extracted from the road database.

The first set of rules can guide the user when collecting data from the infrastructure. The context of a Dynaflect sampling can be established with more or less precision according to the nature of the data available in the pavement management system and according to the quality of the visual information. Using these data, the system can generate the correspondence array that is the most suitable and then perform the proximity computations. The results are then analyzed in order to produce a diagnostic as precise and adapted as possible. Since the knowledge we have at the moment is somehow incomplete and not very precise, this set of rules will probably be revised very often. The declarative way that is used to represent these rules allows one to easily implement the necessary changes.

The second set of rules has been implemented to allow a better understanding of the results. This set is useful to see, when they exist, the soil samplings (extracted from the database) that can be compared to a given type of sensor values that are similar to the ones given to the system. These rules are used to discriminate the results of the soil sampling, the elements belonging to the foundation and to the sub-foundations of the road. Finally, they give a good idea of the structural adequacy of each of the components of the structure and the infrastructure of the road.

To complement the data given, in the knowledge base there is for each Dynaflect sampling a 5 digit numerical signature. This number shows in a very synthetic view the general aspect of the whole set of samplings. The range of values generated by a sensor has been divided into 10 classes of which limits are given by the deciles calculated for each distribution. Thus, each value generated by a sensor can be coded in a digital form. The concatenation of the codes associated with each sensor produces the desired signature. The distance information recorded in the knowledge base allows one to extract for a given signature all the corresponding soil samplings. They are the ones located near of a Dynaflect sampling which has an equivalent signature to the one submitted to the system (to be analyzed). In the best case, the equivalence is exact, but in the other cases, signatures with a difference of +1 or -1 are also considered.

The set of soil samplings generated in this fashion allows one, as demonstrated in a first phase of validation, to obtain important information. It is reasonable to believe that several combinations of structure types and soil could be associated to similar values for the 5 sensors. The way to discriminate between the different possibilities is to integrate complementary information such as the nature of the soil, the type of the road, the subsurface drainage, etc. The intelligent assessment of these indications is one of the tasks of the expert system.

6. Conclusions

The main components of the expert system (road database, knowledge base) have been implemented on an experimental basis on a Compaq SLT286. Arity Prolog has been used for the implementation as well as the SQL interface and the Expert development tool. This product is well suited to such an application since it offers good performances and a development environment flexible enough to enable us to integrate all the components of our system (database, knowledge base, numeric processing, inference engine, etc.). According to our schedule the prototype should enter the test and trial phase during the summer of 1990.

Acknowledgements

We thank the Ministère des Transports du Québec and the Fonds FCAR for their financial support of this project.

References

[Bon88] J. Bonnot: Remise en état des chaussées; Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées; no 153; janvier-février 1988; pages 13:28

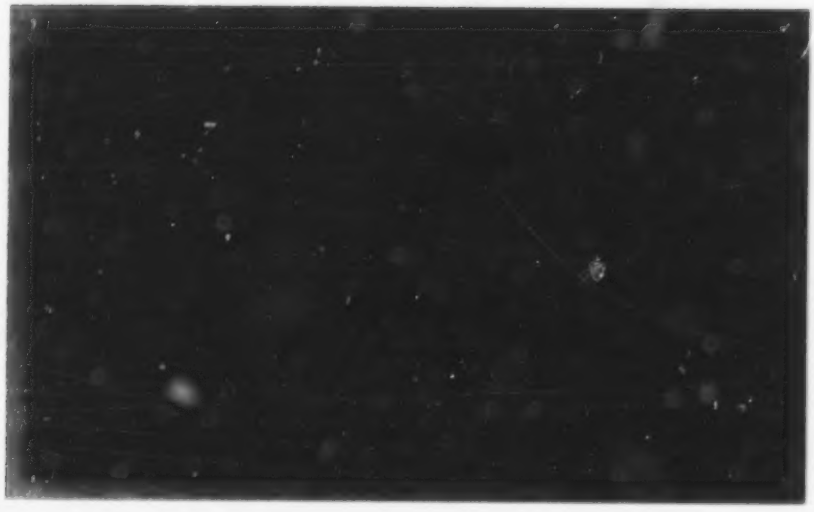
[Arc78] Association des Routes et Transports du Québec; Guide de gestion routière; Edition Agence d'Arc Inc.; Montréal; 1978

[Smi85] R.E. Smith, R.L. Lytton: Use of Nondestructive Testing in the Design of Overlays for Flexible Pavements; Transportation Research Record; 1007; 1985; pages 11:20

[Wah85] Waheed Uddin, A.H. Meyer, W.R. Hudson, K.H. Stokoe: Project-Level Structural Evaluation of Pavements Based on Dynamic Deflections; Transportation Research Record; 1007; 1985; pages 37:45

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
(C.R.T.)
CENTRE FOR RESEARCH ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE



CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
C.P. 6128, SUCCURSALE A.
MONTRÉAL
CANADA H3C 3J7

TÉLÉPHONE: (514) 343-7575
TÉLEX: 05-24146 BIBPOLYTEC
EMAIL: crt@crt.umontreal.ca
TÉLÉCOPIEUR (FAX): (514) 343-7121

Publié dans les comptes rendus du Colloque "La route et l'informatique", Paris, France, 13-15 mars 1990, 646-655.

CRT-701F

UN SYSTÈME EXPERT POUR L'ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ STRUCTURALE DES CHAUSSÉES

par

Bernard Lefebvre[1,2]
Michalis Pehlivanidis[3]
Gaston Larose[3]
Daniel Ferrero[1,2]
Michel Gendreau[2]

[1] Département d'informatique et recherche opérationnelle, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale A, Montréal, Québec CANADA H3C 3J7.

[2] Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale A, Montréal, Québec CANADA H3C 3J7.

[3] Service des sols et chaussées, Ministère des Transports du Québec, 200 boul. René-Lévesque sud, 3e étage, Québec, Québec CANADA G1K 5Z1.

Centre de recherche sur les transports - Publication #701F

Juin 1990

Dépôt légal - 2e trimestre 1990

RESUME

Cette communication présente la méthodologie qui a servi à la constitution d'une base de connaissances pour un système expert. Ce système aide à l'interprétation, sur place, des résultats fournis par un appareil Dynaflect dont le rôle est d'évaluer la capacité structurale des chaussées. Une large part de cette communication est consacrée à la présentation d'analyses statistiques dont les résultats ont permis la mise en place d'un prototype du système envisagé.

Mots clés: Systèmes experts; entretien routier; capacité structurale; Dynaflect.

ABSTRACT

This paper presents a methodology which has been used to constitute the knowledge base of an expert system. This system is intended to help in the on the spot interpretation of the results produced by Dynaflect machines which are used for the assessment of the structural capacity of pavements. The paper is largely devoted to the presentation of a number of statistical analyses. The results of these analyses were used to implement a prototype of the proposed system.

Key words: Expert systems; highway maintenance; structural capacity; Dynaflect.

1. Introduction

Le Dynaflect est un instrument amplement utilisé pour mesurer la capacité d'une route à supporter des charges. L'essai Dynaflect consiste à enregistrer les réponses des oscillations induites à la chaussée par l'appareil. L'essai s'effectue à des espacements qui peuvent varier entre quelques mètres à quelques centaines de mètres. L'utilisation de cet appareil est des plus intéressantes sur les vieilles routes ou celles dont les structures dérogent des critères appliqués de nos jours. Elle permet en effet de déceler par un essai non destructif l'existence de secteurs où la capacité portante de la route peut être considérée comme homogène.

L'interprétation sur place des enregistrements des géophones relatifs à un essai Dynaflect est particulièrement souhaitable puisque lors d'un diagnostic sur les causes de dégradation des chaussées, elle permet de maximiser l'utilité des informations obtenues par les relevés visuels tels que l'aspect de la chaussée, la topographie du terrain, la condition du drainage etc.... Cette interprétation pourrait être facilitée par le développement d'un système informatique intelligent réunissant différentes connaissances en mécanique des chaussées. Elle pourrait alors s'effectuer simultanément à l'essai.

Le but de la présente étude est le développement d'un tel système expert. Cette entreprise est devenue réalisable suite à l'amélioration des conditions d'exploitation des appareils Dynaflect du Ministère des Transports du Québec. Il est maintenant possible d'enregistrer directement sous forme numérique sur un matériel informatique embarqué, les signaux prévenant des cinq géophones.

Certaines études ont déjà été entreprises qui ont pour but d'utiliser les résultats fournis par le Dynaflect pour prédire la capacité structurelle des chaussées [Bon88, Smi85, Wah85]. Elles ont permis la mise en place d'arbres de décision basés sur l'existence de seuils critiques. Ces seuils semblent avoir été établis de façon empirique, car il n'a pas été possible de trouver dans les articles qui relatent ces études une analyse statistique exhaustive qui justifie ces choix. On peut par ailleurs douter qu'ils puissent être utilisés dans toutes les situations et pour n'importe quelle configuration de chaussée. Pour mettre en place la base de connaissances de ce système expert, il a donc été décidé d'entreprendre préalablement une étude permettant de mettre en évidence les capacités discriminantes du Dynaflect ainsi que les relations qui existent entre l'aspect structurel d'une route et les valeurs fournies par les géophones, ceci dans le but de pouvoir donner certaines indications sur la nature de la structure et de l'infrastructure de la chaussée. Cette étude a porté sur les données disponibles dans le système de gestion des chaussées du Ministère des Transports du Québec.

2. La banque de données routières

La banque de données contient les renseignements obtenus sur seize tronçons de routes totalisant environ deux cents kilomètres de longueur, situés dans la partie la plus habitée du Québec, et allant de l'extrémité est à l'extrémité ouest de la province. Ce ne sont pas pour autant des routes à très forte circulation puisqu'elles se retrouvent, pour une bonne part, en milieu rural.

Les deux tiers des routes relevées sont construites en terrain plat et l'autre tiers en terrain vallonné et montagneux. La nature du sol y est très variée, allant du terrain marécageux au socle rocheux en passant par l'argile, le silt, le sable et le gravier.

La stratigraphie mise à jour lors des sondages est très variable. L'épaisseur du revêtement est parfois aussi faible que cinq centimètres ou peut atteindre quarante centimètres, mais elle est le plus souvent comprise entre dix et vingt centimètres. La fondation a une épaisseur variant de vingt centimètres à près d'un mètre, la moyenne étant de soixante-cinq centimètres.

Ces combinaisons ont permis d'obtenir une gamme assez complète de réponses des géophones de l'appareil Dynaflect. Ces réponses ont été corrigées selon les procédures exposées dans [Arc78] pour tenir compte des effets relatifs à la température et elles ont toutes été obtenues pendant la saison estivale. La banque contient actuellement les résultats relatifs à 3120 essais Dynaflect.

Outre ces données relatives aux géophones, on dispose aussi sur le même ensemble de routes de résultats de sondages mécaniques pris en des points qui ne correspondent pas toujours exactement aux points de relevés Dynaflect. Ces données permettent d'obtenir de manière très fine une image de la structure de la chaussée et du sol porteur jusqu'à une profondeur de 3 mètres. La banque contient les résultats de plus de 400 relevés de ce type.

3. Analyse statistique: aspects méthodologiques

Plutôt que d'effectuer une analyse statistique classique à partir de tests conventionnels, ce qui n'aurait donné que des résultats fragmentaires et trop peu fiables étant donné la diversité des situations rencontrées et la trop faible quantité de relevés disponibles, il a été jugé préférable d'opter pour une méthodologie de nature qualitative.

L'analyse a été entreprise à partir d'une compression des données disponibles dans le but d'obtenir une vue plus synthétique du comportement des géophones par rapport aux relevés structurels.

3.1. Compression des données fournies par les géophones

Les valeurs fournies par les 5 géophones ont été pour chacun d'eux réparties en 4 classes délimitées par des seuils qui correspondent aux quartiles (q1 et q3) et à la médiane (q2).

- gi1 regroupe les valeurs pour le géophone i qui sont inférieures au premier quartile q1,
- gi2 les valeurs supérieures ou égales à q1 et inférieures à la médiane q2,
- gi3 les valeurs supérieures ou égales à q2 et inférieures à q3,
- gi4 les valeurs supérieures ou égales à q3.

3.2. Compression des données relatives aux relevés structurels

Ces données de nature complexe et variée ont été interprétées de manière à ne considérer que certains éléments jugés pertinents. Ceci a permis de réaliser une synthèse où certes une grande partie de l'information qualitative est perdue. En contre partie des regroupements de relevés ont pu être obtenus.

On a envisagé successivement deux techniques:

- la première ne retient la présence de matériaux que pour certaines profondeurs typiques,
- la seconde ne considère que certaines couches de matériaux et tient compte de la notion d'épaisseur.

3.2.1. Compression selon la profondeur

Les matériaux pouvant intervenir dans la fondation de la route et le sol support ont été regroupés en plusieurs catégories:]

- le béton bitumineux noté "b",
- les graviers (gw, gp, gm, gc ou leurs combinaisons) notés: "A",
- les sables (sw, sp, sm, sc et leurs combinaisons): "B",
- les argiles (ml, cl, mh, ch): "C",
- les sols organiques: "D",
- les matières organiques: "E",
- le roc: "F",
- les autres éléments: "G".

La sensibilité du Dynaflect étant très grande vis-à-vis de la couche de béton bitumineux, il a été décidé de tenir compte de l'épaisseur de cette couche. On a distingué 3 seuils de valeur croissante (8cm, 11cm et 14cm) qui correspondent aux quartiles et à la médiane. Ces 4 classes d'épaisseurs ont été notées "b1" à "b4". Pour les autres éléments on a simplement tenu compte de leur présence à certaines profondeurs stratégiques:0,3m, 0,5m, 0,75m, 1m et 1,5m. A titre d'exemple, le symbole "10B" a été utilisé pour représenter la présence de sables à la profondeur de un mètre. Ce mode de codage présente l'inconvénient de ne pas tenir compte de l'aspect structurel considéré dans son ensemble. Il serait acceptable si la sensibilité des géophones était limitée à certaines profondeurs: le géophone 1 à la couche de béton bitumineux, le 2 à la première couche de la structure et ainsi de suite. Bien que les seuils aient été choisis en tenant compte de cette hypothèse, on a constaté que certains facteurs comme la présence de roc à des profondeurs relativement faibles avait une influence importante sur l'ensemble des géophones. Pour tenir compte de ce type d'interaction, un deuxième codage a été essayé.

3.2.2. Compression par épaisseurs cumulées

Les données relatives à la structure issues des relevés de sondages ont été regroupées en trois catégories: le béton bitumineux, les graviers et les sables. Pour chacune de ces couches, on a distingué trois classes d'épaisseurs: faible, moyenne et grande. Les seuils qui ont servi à délimiter ces classes valent 10cm et 15 cm pour le béton bitumineux, 30cm et 60cm pour les sables et graviers.

Le symbole "." sert à noter une épaisseur faible ou nulle, le symbole "o" une épaisseur moyenne et enfin "O" note une forte épaisseur.

La nature de l'infrastructure a été prise en compte sous la forme d'un quatrième élément de codage où l'on indique par la lettre "C" l'existence d'un sol de nature argileuse ou par la lettre "F" la présence de roc.

3.3. Les tableaux de données

Les tableaux de données qui ont été constitués sont des tableaux de correspondance qui croisent les données produites par les géophones avec celles fournies par les sondages. Ils permettent de mettre en évidence les liens et associations qui peuvent exister entre ces entités. Le premier tableau croise les variables géophones (gij) avec les variables structurelles du type profondeur, le second utilise ces mêmes variables géophones mais leur associe les catégories de matériaux et d'épaisseurs.

La correspondance entre une variable géophones (g13 par exemple) et une variable sondage de type ".oO" ou "10A" est mesurée par le nombre d'associations observées dans les données

disponibles pour l'ensemble des routes. Il n'a pas toujours été possible d'obtenir pour un point de sondage déterminé les mesures Dynaflect au même point. Cependant comme l'écart est resté faible (de l'ordre de 10 mètres) cette approximation ne nuit pas, de manière générale, à la qualité des résultats. Une étude menée ultérieurement a démontré que dans certaines situations marginales seulement la nature du sol pouvait évoluer rapidement et susciter des différences au niveau des valeurs recueillies par les géophones.

4. Analyse statistique: résultats

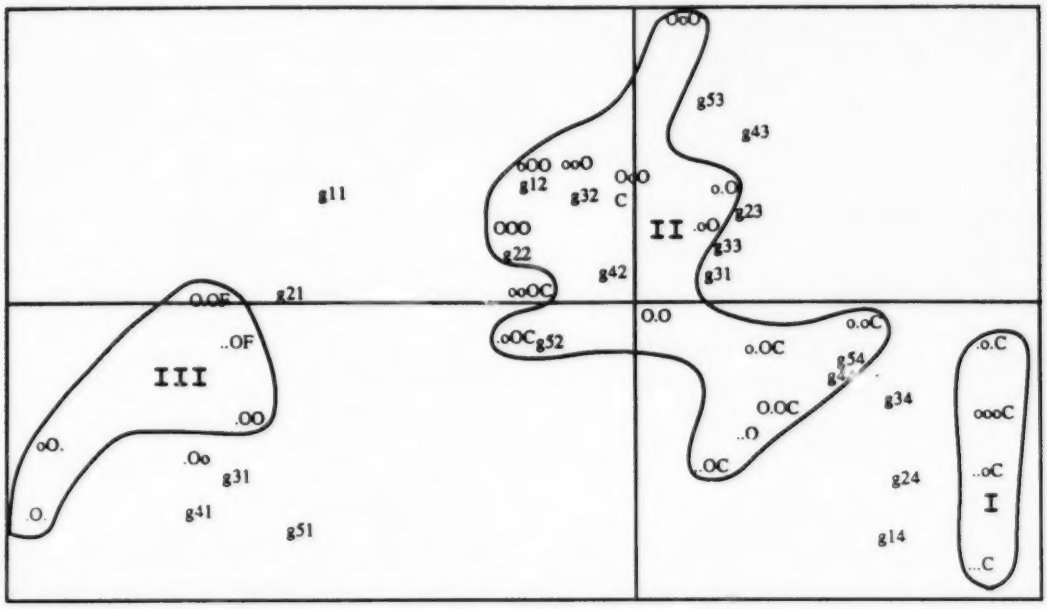
Les tableaux de données ainsi constitués ont été traités au moyen de méthodes d'analyse multidimensionnelle:

- l'analyse factorielle des correspondances d'une part
- et la classification hiérarchique ascendante d'autre part.

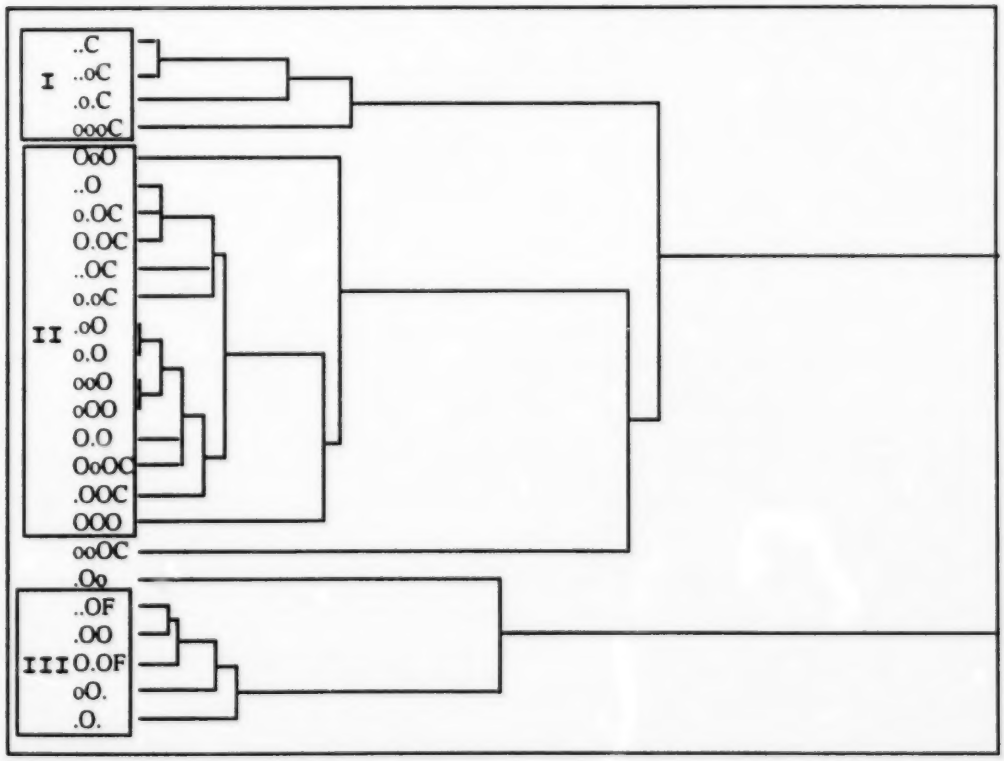
Ces deux méthodes ont été combinées dans le but de mettre en relief l'influence de la structure de la chaussée sur les valeurs recueillies par les géophones. L'analyse des correspondances permet, par le biais d'une représentation visuelle, l'observation des proximités entre les variables intervenant dans le tableau de données: les relevés des géophones d'une part, les éléments structurels d'autre part. Elle permet aussi d'associer ces deux ensembles par le truchement d'une représentation simultanée qui met en relief les influences que les éléments du premier groupe peuvent avoir sur le second et réciproquement. La classification hiérarchique ascendante permet quant à elle d'effectuer des regroupements entre variables d'un même type. Ces regroupements peuvent être reportés et visualisés dans la représentation fournie par l'analyse factorielle. Ils permettent ainsi d'obtenir un meilleur résumé. L'analyse des interactions entre variables s'en trouve facilité.

Un grand nombre d'études ont été menées combinant les différentes formes de codage et prenant en compte certains aspects structurels. Il n'est pas possible ici de présenter l'ensemble des résultats obtenus, aussi seuls quelques exemples sont détaillés par la suite.

Le plan des axes 1 et 2 ci-dessous présenté permet de révéler environ 70% de l'inertie totale. Il donne donc un résumé assez fiable des proximités relatives ainsi que des influences respectives entre géophones et relevés structurels. Les combinaisons de structures ayant un effectif trop faible ont été retirées de l'analyse qui n'est donc que partielle. L'axe 1 (horizontal) oppose les valeurs élevées des géophones aux valeurs faibles. Il oppose également les structures de chaussées sur sol argileux aux mêmes structures sur sol rocheux. L'axe 2 (vertical) est influencé par le comportement du géophone 1 et il oppose les chaussées à faible couche de



Analyse factorielle des correspondances du tableau des géophones et aspects structurels par épaisseurs: plan des axes 1 et 2



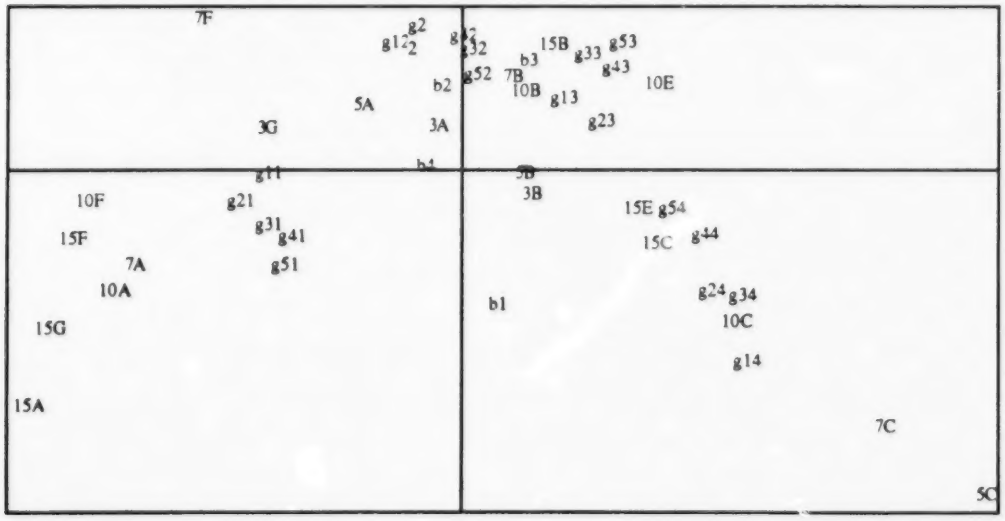
Classification hiérarchique ascendante des aspects structurels

béton bitumineux à celles qui en ont une couche épaisse. On peut constater que, sauf pour la classe des valeurs faibles, il n'y a que de faibles nuances de comportement entre les géophones 1 à 5.

Une classification hiérarchique ascendante utilisant la distance du Chi2 et le critère d'agrégation du barycentre a permis de distinguer 4 classes principales dont les éléments ont été reportés sur la représentation factorielle. On y distingue:

- une classe (I) formée de chaussées faibles sur sol argileux,
- une classe (II) de bonnes chaussées ou de chaussées présentant quelques défauts de structure,
- une dernière classe (III) formée de chaussées d'un profil semblable à celui de la classe 2 mais reposant sur un sol ou rocheux ou très ferme et probablement constitué de gravier.

L'élément le plus notable à retenir de ces représentations est l'illustration de l'influence du sol support sur les valeurs obtenues par les géophones. C'est un des facteurs qui doivent être pris en compte par le système expert lors de l'analyse des résultats. Cette influence peut également être remarquée sur les résultats d'une étude conjointe où les aspects structurels sont représentés par un codage où seule apparaît la présence de matériaux à certaines profondeurs.



Analyse factorielle des correspondances du tableau des géophones et aspects structurels par profondeurs: plan des axes 1 et 2

Les sols rocheux et de gravier donnent des valeurs faibles pour l'ensemble des géophones. Ils s'opposent aux sols argileux qui eux donnent des valeurs fortes. On peut également remarquer que

plus la présence d'argile est proche de la surface plus cette tendance aux valeurs fortes s'accentue et se fait sentir au niveau du géophone 1. Comme cela a déjà été remarqué, cette représentation ne prend pas en compte l'aspect structurel dans sa globalité. Les indications qu'elle donne doivent donc être nuancées et soumises à un examen complémentaire.

Ces études démontrent la bonne sensibilité et le pouvoir discriminant du Dynaflect aussi bien au niveau de la structure de la chaussée qu'au niveau de l'infrastructure. Les données disponibles sont en quantité trop faible pour permettre de prendre en compte complètement au niveau du codage tous les aspects liés à la structure et à l'infrastructure de la route. Ces études partielles ont néanmoins permis de mettre en place une méthodologie d'analyse et de génération de règles. On dispose d'un ensemble primitif de résultats qui pourra être complété et réactualisé quand de nouvelles données seront disponibles dans le système de gestion des chaussées. A terme on devrait disposer d'un ensemble de tableaux de données, chacun d'eux correspondant à une situation particulière au niveau de l'infrastructure de la route: sol argileux, sol organique, sol rocheux, etc. Dès que le contexte relatif à un point de mesure Dynaflect aura été établi et le tableau de données adéquat choisi, un calcul de distance simple et rapide permettra d'extraire les structures de chaussée du type ".oO" les plus proches et donc de donner les meilleures associations possibles entre le profil de mesure géophones et les profils structurels.

5. La base de connaissances du système expert

Cette base est expérimentale et comporte deux ensembles complémentaires de règles:

- des règles permettant de mettre en œuvre une méthodologie d'analyse fondée sur les résultats des études statistiques multidimensionnelles,
- des règles analysant un ensemble de situations analogues extraites de la base de données routières.

Le premier ensemble de règles permet de guider l'utilisateur dans le recueil des données relatives à l'infrastructure. Le contexte d'une mesure Dynaflect peut ainsi être établi avec plus ou moins de précision suivant la nature des données de sondages disponibles dans le système de gestion des chaussées et la qualité des observations visuelles sur le site même. En fonction des éléments ainsi obtenus, le système choisit le ou les tableaux de correspondances les plus pertinents et opère pour chacun d'eux les calculs de proximité. Les résultats obtenus sont ensuite analysés afin de produire un diagnostic aussi précis et adapté que possible. Les connaissances dans le domaine étant encore incomplètes et imprécises, cet ensemble de règles présentement à l'état primitif sera sujet à des révisions constantes. La forme déclarative utilisée pour implanter ces règles dans le système expert permet de réaliser facilement les adaptations nécessaires.

Le deuxième ensemble a été mis en place dans un but d'apprentissage et pour aider à la compréhension des résultats. Il permet d'observer, dans la mesure où ils existent, les résultats de sondages provenant de la base qui ont pu être associés à un profil de valeurs de géophones comparable à celui qui a été soumis au système. Ces règles permettent de séparer dans l'ensemble des résultats d'un sondage mécanique, les éléments relatifs à la fondation et à la sous-fondation de la route. Elles donnent également une appréciation sur la qualité de chacune des composantes de la structure et de l'infrastructure de la chaussée.

Pour compléter les informations fournies, on a associé dans la base à chaque série de mesures Dynaflect, un profil constitué par un nombre décimal de 5 chiffres. Ce nombre donne d'une manière synthétique et économique l'aspect que présente l'ensemble des relevés. L'éventail des valeurs données par un géophone a été divisé en 10 classes dont les seuils sont les quantiles d'ordre 10 calculés pour chaque distribution. Chaque valeur délivrée par un géophone peut être ainsi codée sous la forme d'un chiffre. La concaténation des codes obtenus pour chaque géophone produit le profil désiré. Les indications de chaînage enregistrées dans la base permettent d'extraire pour un profil donné quels sont les sondages qui lui correspondent. Ce sont ceux qui sont situés à un niveau de chaînage voisin d'un point de mesure Dynaflect ayant un profil équivalent à celui soumis à l'analyse. Dans le meilleur des cas l'équivalence est exacte mais en cas de défaut on peut admettre les profils présentant une similitude d'ordre 1 (une différence d'une unité).

L'ensemble de sondages ainsi donné par le système permet, comme l'a démontré une première validation sur le terrain, d'obtenir des indications précieuses sur la nature possible de la structure et le sol support sous-jacent. Il est en effet raisonnable de considérer que plusieurs combinaisons de qualité de structure et de sol support puissent être associés à des enregistrements semblables des cinq géophones. La discrimination entre les cas possibles peut alors être entreprise en intégrant certaines indications complémentaires comme la nature du sol support, la catégorie de route, l'état du drainage... L'évaluation sélective et intelligente de ces indications est une des tâches du système expert.

6. Conclusion

Les composantes principales du système expert (base de données routières, base de connaissances) sont implantées à titre expérimental sur un matériel Compaq SLT 286. Le langage de développement est Arity Prolog doté de ses interfaces SQL et Expert. Ce produit offre en effet de bonnes performances et un environnement de développement suffisamment riche permettant d'intégrer toutes les composantes du système (bases de données, procédures numériques de calcul

des proximités, base de connaissances, moteur de résolution,...). Le prototype réalisé à l'aide de ces moyens doit être testé sur route lors de campagnes de mesures programmées pour l'été 1990.

Remerciements

Nous tenons à remercier le ministère des Transports du Québec et le Fonds FCAR pour leur support financier.

Bibliographie

[Bon88] J. Bonnot: Remise en état des chaussées; Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées; no 153 janvier-février 1988; pages 13:28

[Arc78] Association des Routes et Transports du Québec; Guide de gestion routière; Edition Agence d'Arc Inc.; Montréal; 1978

[Smi85] R.E. Smith,R.L. Lytton: Use of Nondestructive Testing in the Design of Overlays for Flexible Pavements;Transportation Research Record; 1007; 1985; pages 11:20

[Wah85] Waheed Uddin, A.H Meyer, W.R. Hudson, K.H. Stokoe: Project-Level Structural Evaluation of Pavements Based on Dynamic Deflections;Transportation Research Record; 1007; 1985;pages 37:45